

# 基于多层协作机制的人员疏散模拟研究

唐方勤<sup>1</sup>, 史文中<sup>2</sup>, 任爱珠<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 香港理工大学 建设与地政学院, 香港)

**摘要:** 为加强疏散模拟的真实性, 在充分研究疏散复杂性的基础上, 提出了基于多层协作机制的疏散模拟方案。分别采用智能体模型、地理信息系统模型和元胞自动机模型对人员描述层、建筑环境层与驱动转换层等功能层次进行了构建。各层次在实现自身功能的同时交互协作, 达到整体功能的优化。模型较好地反映了建筑布局特征与人员疏散行为特征, 实现了元胞状态的动态描述与记录, 具有多层协作机制良好的扩展性。模拟结果与实测值和经验公式值相比较, 符合较好。

**关键词:** 消防; 多层协作机制; 智能体模型; 地理信息系统; 元胞自动机模型

中图分类号: TU 998.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2008) 03-0325-04

## Multi-level collaboration-based simulation of crowd evacuation

TANG Fangqin<sup>1</sup>, SH Wenzhong<sup>2</sup>, REN Aizhu<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Faculty of Construction and Land Use, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** The authenticity of evacuation simulations is improved by using multi-level collaboration mechanism based on research of evacuation complexities. An agent model is used for the occupant description, a geographical information system model is used for the architectural environment, and a cellular automata model is used for the drive and conversion. The levels collaborate to optimize system functionality. The evacuation model has good expansibility of the multi-level collaboration mechanism, fully reflects the characteristics of the architectural plan and the human evacuation behavior, and is able to represent and record real-time states for all cells. The simulation results agree well with experimental data and empirically estimated values.

**Key words:** fire protection; multi-level collaboration mechanism; agent model; geographical information system; cellular automata model

员疏散问题逐渐受到研究者的广泛关注。鉴于疏散研究的特殊性, 组织人员进行实验难度较大, 实验数据也难以采集。随着现代计算机软硬件水平不断提升, 计算机模拟逐渐成为疏散研究的重要手段。为使疏散模拟更符合实际状况、提高运行效率, 研究者们不断尝试着从相关领域借鉴方法和技术。目前这方面的研究热点是基于智能体技术的疏散模型。比较典型的实例包括: Henein 等的人群疏散模型<sup>[1]</sup>、Pelechano 等的建筑疏散模型<sup>[2]</sup>、Murakami 等的危急疏散模型<sup>[3]</sup>等。该类模型首先构造多个智能体并确定各自的疏散行为特征, 再将这些智能体放置于虚拟的建筑场景中, 以个体自主决策和交互行为表现整体疏散。但是单纯依靠智能体技术的模型无法反映建筑布局的实际状况, 在动态描述空间单元状态转换以及存储状态信息等方面存在明显不足。

本文提出了多层协作机制的疏散模拟方案, 在此基础上运用智能体、地理信息系统(geographical information system, GIS)与元胞自动机(cellular automata, CA)模型等理论构建了多层协作的疏散模型。该模型详细描述人员与场景的交互, 客观反映现实状况, 确立数据组织与事件驱动机制, 具有较强的时空表达能力。以该模型为基础, 本文通过具体的编程实现, 开发了疏散模拟程序, 并在系统中以香港理工大学教学楼某段为场景进行了人员疏散模拟。

## 1 多层协作机制的疏散模拟方案

多层协作机制是指通过不同功能层次间的交互协作实现整体功能的优化, 并提高系统的运行效率。在建模时, 先对整体功能进行细分, 再据此构筑不同的结构层次, 最后对层次间的交互协作加以描述。其优点在于可获得良好的整体功能, 易于进行扩展和

收稿日期: 2007-01-18

作者简介: 唐方勤(1982—), 男(汉), 四川, 博士研究生。

通讯联系人: 任爱珠, 教授, E-mail: raz-aci@tsinghua.edu.cn

维护, 各功能层次相对独立, 可根据自身功能选取合适的技术路线。

本文对疏散模型进行细分得到 3 个层次: 人员描述层、建筑环境层和驱动转换层。根据各自的功能特征, 分别采用智能体模型、GIS 模型与 CA 模型进行了构建。各层次充分发挥自身技术特点, 保证了系统的功能与效率。

1) 人员描述层。该层按照智能体模型刻画个体的疏散行为特征, 并为其制定了基于建筑布局特征的疏散策略, 实现了智能体的自主决策及智能体之间、智能体与场景之间的自主交互。

2) 建筑环境层。该层利用 GIS 技术强大的空间分析功能, 对建筑场景进行全面细致的描述, 并通过 GIS 可视化引擎将模拟场景输出至图形界面。

3) 驱动转换层。该层借助 CA 模型的时空建模功能, 通过定时器激发动态转换各地理栅格的状态, 并根据 CA 元胞平面的分布结构实现相应信息的记录与存储。CA 模型理论由 Von Neumann 在 20 世纪 40 年代后期提出<sup>[4]</sup>。作为物理系统的抽象模型, 它能够实现时间、空间四个维度的离散化, 并为每一元胞设定有限集范围内的具体状态<sup>[5]</sup>。

各功能层次间存在交互协作和信息的输出共享。图 1 表示了疏散模拟的多层协作机制。

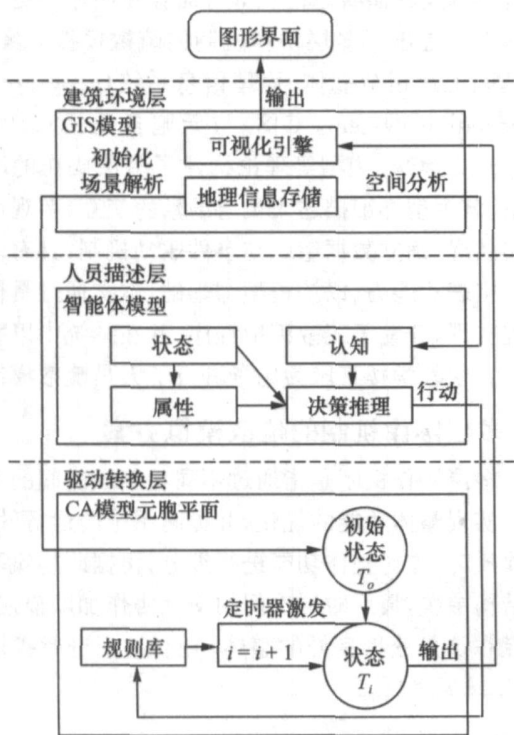


图1 疏散模型的多层协作机制示意

## 2 人员描述层

人员描述层主要负责对疏散过程中的个体行为特征进行刻画。本文采用智能体技术对该层进行构建; 在详细考察物理实体关键特征的基础上, 抽象概括得到模型实体。由此提出抽象化模型的运作模式为

$Action = F(State, Property, Knowledge)$ . (1)  
其中: Action 是智能体当前时间步作出的行动, State 反映了人员目前的生理心理状态, Property 为智能体具有的行为属性, Knowledge 表示人员对环境的认知掌握, 而  $F$  则对应于人员在疏散过程中作出的决策推理。

在状态、属性和认知等方面, 模型设计了多项量化参数, 如表 1 所示。

表1 智能体模型的量化参数

符号	含义
$H$	体力
$M$	行动灵敏度
$S$	自由状态下运动速率
$T_R$	反应时间
$C$	协作因子
$Ins$	决策支持因子
$K$	环境认知区域

根据经验总结和相关研究, 可为上述参数设置取值分布。 $H$ 、 $M$  的值域为  $[0, 100]$ , 反映人员当前的身体状态。当场景中存在火灾等危害因素时, 其值可能会依据危害评估而减小, 从而影响智能体的行为。 $S$  描述了宽敞开阔地带人的通行能力, 从跑动、走动两方面考虑。跑动速率一般可认为在  $3 \sim 7 \text{ m/s}$  区间内, 走动速率在  $1.2 \sim 1.8 \text{ m/s}$  区间内<sup>[6]</sup>。 $T_R$  是指疏散警报响起到真正实施有效疏散行为的时间间隔, 其分布具有区域性, 同一建筑单元内人员反应时间大体相同。 $C$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 反映了智能体的社交性。该参数越大, 智能体越易与周围智能体发生协作关系。 $Ins$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 值越大表明智能体对逃生策略的坚持程度越高。它与人员的心理素质、信念、魄力及性别等多种因素有关。女性改变决策折返的几率要高于男性<sup>[7]</sup>。 $K$  的取值随人员对场景熟悉等级的增加, 可由个体视野范围扩展至整个疏散场景。建筑环境层对各智能体的环境认知区域  $K$  进行空间分析, 其分析结果是智能体认知的形成基础。

智能体模型仅有状态、属性和认知还不能形成

思维, 无法实现智能体的自主性。决策推理规定了智能体如何基于对周围环境的认知, 通过推理规则对目前形势进行分析判断, 以确定下一步的行为方案。本研究设定智能体基本行为规则为: 以距自身最近的安全出口为目标, 按基于建筑布局特征的疏散策略进行疏散。该策略借助智能体对环境形成的认知掌握, 从当前所在的建筑单元( 房间、走廊等), 按既定单元类型顺序到达安全出口。

为加强智能体对情形的自适应性、健全推理机制, 在基本规则的基础上还设计了附加规则。例如, 在疏散策略效率偏低时, 可考虑采取新的疏散方案。又如, 分析场景中存在的安全隐患, 在兼顾疏散效率的同时加以规避。由于智能体的状态、属性、认知都会对决策推理造成影响, 因此智能体的实际决策并非完全遵循理想的推理规则。如当人员对建筑布局认知不足时, 可能导致智能体选择的疏散路线偏离全局最优路线。

智能体每时间步的决策信息将与驱动转换层的CA 模型共享; CA 模型通过场景布局与元胞平面之间的映射, 按相应规则库改变元胞状态, 记录智能体的行动流向。

### 3 建筑环境层

本文在建筑环境层中引入了GIS 技术。运用GIS 技术, 可以在建筑环境层中提取地理环境信息并分析实体的空间位置关系。截至目前, 绝大多数GIS 技术都是应用于大区域问题, 很少应用于小区域疏散问题。本文工作证明, 只要图纸具有足够的精度, 利用GIS 空间分析功能, 完全可以达到模拟需要的精度。

建筑环境层的主要内容包括针对建筑方案的初始化场景解析以及实时空间分析。这些分析过程得到的结果, 将与其他功能层次进行交互: 建筑方案的解析结果与驱动转换层CA 模型的元胞平面相对应, 成为确定各元胞初始状态的依据; 空间分析的结果则为人描述层智能体模型的行为决策提供不可缺少的环境信息。

场景解析是按照各建筑单元类型完成整个建筑方案的栅格化过程。一般情况下可根据单元类型对建筑方案进行划分。GIS 文件作为建筑方案的载体, 可由不同的图层存储不同类型的建筑单元, 由此形成图2 所示的分层存储结构。其优点在于: 存储文件包含整体信息和分类信息, 方案表达更具条理, 易于解析过程的进行。各图层分离则对应于特定类型的

建筑单元, 叠加可描述完整的建筑方案。

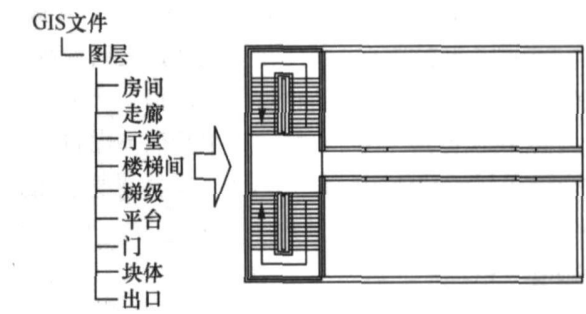


图2 建筑方案的GIS 存储与描述

读取GIS 文件可得到不同建筑单元的存储图层并导入至模型类包。各单元在GIS 数据库中对应于不同的图形结构( 如poly line、polygon 等)。根据图形结构自身的特征, 模型类包运用GIS 空间分析功能, 分析各图元间的拓扑关系得到解析数据。通过建立其与CA 元胞平面之间的映射, 确定了CA 模型对应元胞平面上各元胞的初始状态。

实时空间分析则主要根据人员的当前位置, 构建一定缓冲区对环境状况进行分析。分析内容既包括建筑布局相关的特征信息, 如判断人员所处的建筑单元, 分析邻近建筑单元的空间位置关系, 寻找目标出口等, 也涉及疏散过程中人员邻近区域的人流密度分布。这些环境信息构成了智能体模型对建筑环境的认知, 是人员疏散策略制定的基础。

建筑环境层还借助GIS 可视化引擎对驱动转换层输出的元胞状态与模拟结果进行渲染描述。利用GIS 可视化引擎可充分满足可视化表达的需要。

### 4 驱动转换层

驱动转换层作为多层协作中不可缺少的联系与支持, 在各时间步负责离散化空间的状态转换与记录, 并对整体模型的运作进行驱动。驱动转换层借助CA 模型的离散化运算, 有效加强了整体模型的时空表达能力。CA 模型从元胞、状态、邻域和规则出发, 确立了按既定规则与邻域关系动态描述元胞状态的机制。以下给出四元组在本研究中的具体含义。

1) 为确保每个栅格最多仅由1 人即1 个智能体占据, 建筑的每个楼层以0.4 m × 0.4 m 的方格进行划分; 模型时间由统一的模拟时钟给出。

2) CA 模型的有限状态集合Φ本文定义为

$$\Phi = \{0, 1\} \quad \Psi. \tag{2}$$

其中: 0 表示该元胞状态为空, 即该空间位置既无人员, 也无建筑结构的情况; 1 则对应于该位置被人员占据的状态;  $\Psi$  是建筑单元类型集, 具体可定义为

$\Psi = \{\text{room, corridor, lobby, staircase, step, landing, door, block, exit}\}$ . (3)

当元胞状态取  $\Psi$  集合中的某值时,表明元胞对应的空间位置由该类型的建筑单元占据。

3) 按照方格划分, CA 模型中我们考虑将与元胞位置相邻的其他元胞作为邻域。通常情况下元胞的邻域有 8 个;对于场景边上的元胞有 5 个,角上的则有 3 个。

4) CA 模型的规则库指定了当前邻域关系下元胞状态的转换规则。规则库不仅要分析当前时间步元胞及邻域的状态,还应充分考虑人员在当前时间步作出的行为决策。两方面因素的综合考虑,决定了元胞随时间步的状态转换,同时也记录了智能体的行动流向。

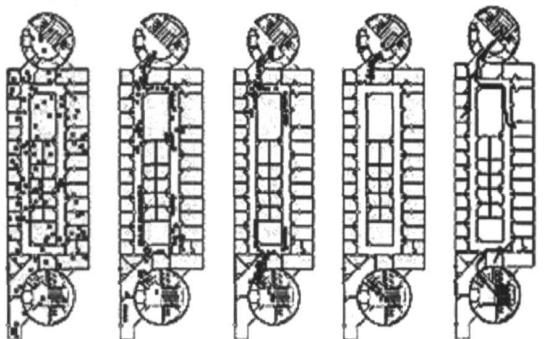
驱动转换层通过 CA 模型得到的离散时间,对智能体模型的运作进行驱动;而智能体的行动也会导致 CA 模型离散化空间单元作出状态转换。转换结果最终交由建筑环境层的 GIS 可视化引擎,实现人员行动的直观描述。

5 系统开发与应用

根据上述疏散模拟的多层协作机制,本文作者运用 Microsoft C# 作为开发语言,并调用 ArcGIS Engine 函数库开发了疏散模拟系统。运用该系统可读取以 GIS 格式存储的建筑方案,在该方案布局中进行疏散模拟及过程演示,并根据模拟结果提供人员行为的统计及疏散轨迹的查询等。系统基于多层协作机制实现模拟运算,形成统一的集成界面,通过该界面可很好地完成人机交互。

将基于多层协作机制的疏散模型应用于香港理工大学某段进行疏散模拟。该段的结构特征是:主体为典型框架结构,两端设楼梯间、管道设备间等集中形成筒形结构,底部平台以上共有 6 层,各层结构布局大体相似。本研究在此场景中进行多次模拟,每次按不同的初始化密度生成人员的随机分布。对应于本模拟状况,对智能体模型作出如下参数假定: $H$ 、 $M$  值保持 100 不变。 $S$ 、 $C$  和  $Ins$  等参数值在允许值域内随机选取。不考虑人员的反应时间,即  $T_R$  设置为 0。假定人员均对场景熟悉,即  $K$  设置为整体场景。模拟中可观察到:在房间等建筑单元内各人员个体独立性较强,轨迹也较为分散。而在走廊、楼梯间等单元则易出现聚集效应,形成一定密度、一定流向的人流。当人员初始化密度较小时,各楼梯间人员密度基本同步增加,底部楼梯间峰值持续时间较长。

而当初始化密度逐步增大超过阈值时,各层入口与楼梯间将出现滞留现象,楼梯间人员密度按从上至下的顺序逐渐加大,在达到峰值后,随人员疏散进程相继呈减小趋势,当疏散结束时人员密度降至 0。图 3a—3d 显示了具体疏散过程。



(a)  $t=0\text{ s}$  (b)  $t=10\text{ s}$  (c)  $t=20\text{ s}$  (d)  $t=40\text{ s}$  (e) 疏散轨迹  
图 3 不同时刻疏散模拟示意

模拟结束后,系统将本次模拟的相关信息记入综合数据库,在此基础上可绘制出任意人员在疏散过程中的行动轨迹以便进行进一步分析,如图 3e 所示。对不同情形的疏散场景,只需调整系统及智能体模型等参数即可实现模拟。

为验证模型的准确性,需要设置不同情况进行验算。首先,在自由状态下,单人从楼层 5 到达平台所需时间实测约为 120 s,模型计算疏散时间为 137 s。其次,改变人员分布密度即人员总数进行多次疏散模拟。按照 Pauls 的实验总结,当楼梯有效宽度内通过的人员数小于 800 人/m 时,可采用下述两个拟合公式对疏散时间进行估计<sup>[8]</sup>:

$$T = 0.68 + 0.081p^{0.73}, \tag{4}$$

$$T = 2.00 + 0.0117p. \tag{5}$$

其中:  $T$  为总疏散时间(min),  $p$  为楼梯有效宽度内通过的人员数(人/m)。

将模拟得到的计算数据与 Pauls 公式值进行比较,如表 2 所示。

表 2 模型计算时间与经验公式值的比较

人员总数	模型计算时间 $t/s$	$t_{(4)}/s$	$t_{(5)}/s$
116	137	111	147
224	154	154	172
342	183	195	199
437	212	225	222
547	252	258	248
657	288	289	273

注:  $t_{(4)}$ 、 $t_{(5)}$  分别为式(4)、式(5)的计算值。

从表 2 可以看出,模型计算时间与 Pauls 经验公式值是吻合的。

手段;然而上海商品住宅价格的上涨可能会引发通货膨胀,有必要运用行政手段等较直接的措施,尽快降低房价的快速上涨,以维护市场经济体系的稳定发展。

### 参考文献 (References)

- [1] Anari A, Kolari J. House Prices and Inflation [J]. *Real Estate Economics*, 2002, **3**(30): 67 – 84.
- [2] Fama E F, Schwert G W. Asset returns and inflation [J]. *Journal of Financial Economics*, 1977, **4**(5): 115 – 146.
- [3] Spellman L J. Inflation and housing prices [J]. *Journal of the American Real Estate and Urban Economics Association*, 1981, **6**(9): 205 – 222.
- [4] Rubens J H, Bond M T, Webb J R. The inflation-hedging effectiveness of real estate [J]. *Journal of Real Estate Research*, 1989, **2**(4): 45 – 56.

- [5] 田江海. 房地产投资与通货膨胀的关系 [J]. 北京房地产, 1996, **2**(2): 30 – 33.  
TIAN Jianghai. Relationship between real estate investment and inflation [J]. *Journal of Beijing Real Estate*, 1996, **2**(2): 30 – 33. (in Chinese)
- [6] 高红. 房地产投资对通货膨胀的影响 [J]. 中国房地产, 1996, **12**(5): 23 – 27.  
GAO Hong. Influence of real estate investment on inflation [J]. *Journal of China Real Estate*, 1996, **12**(5): 23 – 27. (in Chinese)
- [7] 李子奈, 叶阿忠. 高等计量经济学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
LI Zinai, YE Azhong. *Advanced Econometrics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)

(上接第328页)

## 6 结 论

应用实例表明,模拟效果符合实际情况,计算数据与实测值和经验值相吻合,对基于疏散安全的建筑方案设计与评估具有实际意义。对不同情形的疏散场景,只需调用相应的GIS文件并调整系统及模型参数即可实现模拟。本文提出的疏散模型经公式验证具有一定的准确性,但还需进一步研究加以拓展完善。例如,增加行为参数以细化智能体模型对人员个体行为的描述、结合灾害场模拟考虑灾害的发生发展对人员的影响等。由于多层协作机制具有良好的扩展性和维护性,可引入新的功能层次加以描述并相对独立地对某功能层次进行细化,因此降低了模型拓展完善的难度。

### 参考文献 (References)

- [1] Henein C M, White Tony. Agent-based modelling of forces in crowds [J]. *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, 2005(3415): 173 – 184.

- [2] Nuria P, Norman B. Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2006, **26**(6): 80 – 86.
- [3] Murakami Y, Minami K, Kawasoe T, et al. Multi-agent simulation for crisis management [C]//Proceedings of the IEEE Workshop on Knowledge Media Networking. Washington DC: IEEE Computer Society, 2002: 135 – 139.
- [4] Von Neumann J, Burks A W. *Theory of Self-Reproducing Automata* [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
- [5] Bastien C, Michel D. *Cellular Automata Modeling of Physical Systems* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [6] Smith R A. Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds [J]. *Safety Science*, 1995, **18**(4): 321 – 327.
- [7] Polus A, Schafer J L, Ushpiz A. Pedestrian flow and level of service [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1983, **109**(1): 46 – 57.
- [8] Pauls J. Calculating evacuation times for tall buildings [J]. *Fire Safety Journal*, 1987, **12**(3): 213 – 236.